



一种基于跨层反馈信息的下行 OFDMA 资源分配策略^{*}

尹逊宫,冯 辉,杨 涛,胡 波
(复旦大学电子工程系 上海 200433)

摘 要:基于跨层调度的思想,本文深入研究了正交频分多址(OFDMA)系统中的资源分配问题。本文提出的调度算法联合利用了媒体访问控制(MAC)层的确认字符(ACK/NAK)信息和物理层(PHY)周期反馈的用户信噪比(SNR)信息。同时该调度问题在本文中被建模成一个带有跨层观测信息的部分观测马尔科夫决策过程(POMDP)。为了降低复杂度,本文利用了一个简化的模型,使其能够应用于实际的系统中。数学仿真显示,本文提出算法的性能十分接近 Aggarwal R 等人提出的理论上限,并且通过利用 ACK/NAK 信息大大减小了系统的反馈开销。

关键词:OFDMA;跨层调度;资源分配;有限反馈

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.03.0011

Scheduling and Resource Allocation in OFDMA Downlink Systems Using Cross-Layer Feedback

Yin Xungong, Feng Hui, Yang Tao, Hu Bo
(Department of Electronics Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The problem of the cross-layer scheduling and resource allocation in orthogonal frequency division multiplexing access (OFDMA) downlink was considered, utilizing the ACK/NAK in MAC layer and periodic feedback of users' SNR in physical layer simultaneously. This problem was modeled as a partially observable Markov decision process (POMDP) with cross-layer observations, and a simplified version was proposed to reduce the computational complexity. Numerical experiments show that the performance of the algorithm is relatively close to the upper bound proposed by Aggarwal R, and does not increase the system overhead of feedback.

Key words: OFDMA, cross-layer scheduling, resource allocation, limited-feedback

1 引言

现在的无线通信系统已经广泛采用了正交频分多址(OFDMA)技术,并且 OFDMA 技术已成为 3GPP LTE 的下行链路的主流多址方案。OFDMA 是 OFDM 技术的演进,其是在利用 OFDM 对信道进行子载波化后,在部分子载波上

加载传输数据的传输技术。OFDMA 通过将不同的子载波分配给不同的用户实现多址的接入。由于不同的用户在相同的子载波上有不同的 SNR,因此通过自适应的资源和功率分配可以达到更高的码率和多用户增益^[1]。

在 OFDMA 调度和资源分配问题中,很多算法都依赖于信道状态信息(CSI),因此调度的核心问题就成了基站

^{*} 国家重大专项基金资助项目(No.2010ZX03002-003-01, No.2011ZX03003-001-02, No.2012ZX03001007-003),国家自然科学基金资助项目(No.60972024)

如何得到信道状态信息。根据得到 CSI 方式的不同,前人的工作主要可以分为两大类。

第一类都是假设基站端可以得到理想的 CSI (如参考文献[2~6])。在这类假设条件下,系统为了最大化系统容量,可以将每个子载波分配给具有最优信道质量的用户^[5-6]。但在实际系统中,基站很难得到理想的 CSI。

第二类,基站只能知道部分的 CSI 信息。因此,实际的资源分配方案一般只能利用有限反馈的信息^[7](如 LTE 系统中采用量化的信道增益)。显而易见,调度的性能取决于有限反馈的质量,因此在时变的无线信道环境中,有限反馈的设计就显得尤为重要,但也是相当复杂的。同时过大的反馈开销对于实际系统来说是个灾难性的负荷,因此必须研究优秀的算法来保证系统性能和反馈开销之间能够取得一个合适的折中。所以很多已有文献提出了自己的方案降低反馈开销。现在很多无线通信系统中都存在自动重传请求 (ARQ) 机制^[8],而 ARQ 可以提供 ACK/NAK 反馈,因此参考文献[9~11]考虑利用了已有的 ACK/NAK 反馈来降低系统的反馈开销。尽管 ACK/NAK 反馈不能提供关于信道的直接信息,但基站仍然可以从中得到很多间接且有用的信息。例如,如果用户反馈了一个 NAK 信号给基站,那么它暗示了基站对信道 SNR 的估计过于乐观,此时,基站就必须修改自己的调度策略。在 TDD 模型下,一般假设基站可以通过对上行信道的估计得到近似的下行信道信息。参考文献[9]正是在 TDD 模型下,利用 ACK/NAK 反馈信息和不准确的 CSI,提出了一种基于状态—空间的近似方法进行用户/码率调度和功率分配。然而参考文献[9]提出的方法无法直接应用在 FDD 系统中。参考文献[10]提出了一种只利用 ACK/NAK 反馈信息的调度方案,但是仿真证明系统的容量上限将受到很大的限制,而且多用户的增益也不明显。这是因为随着活跃用户数量的增加,在每个调度时刻只有一部分用户得到调度,因此调度算法^[10]无法得到所有用户的瞬时反馈。

在实际的 FDD 下行系统中,为了调度的需求,用户会反馈自己量化过的信噪比给基站。但过于频繁的反馈会导致过大的反馈开销,这对于实际系统来说是无法忍受的。所以,从直观上来讲,联合利用 ACK/NAK 信息和 SNR 反馈进行调度可以得到反馈开销和系统性能的一个很好的折中。在本文中,为了得到更加准确的 CSI 和减少反馈开销,利用了 ACK/NAK 信息估计和更新信道的后验分布。但就像参考文献[10]所述一样,随着活跃用户的增加,多用户

增益将不明显。为了避免该问题,本文利用周期反馈的 SNR 进一步修改信道的状态以便于得到更多的多用户增益。由于本文同时利用 MAC 层的 ACK/NAK 信息和物理层周期的 SNR 反馈,因此本文属于“跨层优化”问题。

受参考文献[10]启发,本文将该最优化问题建模成一个部分观测马尔科夫决策过程 (partly observable Markov decision process, POMDP) 问题。本文将 ACK/NAK 信息和周期反馈的 SNR 信息作为该问题的联合观测。而决策空间则是子载波调度、码率选择和功率分配的一个集合体。同时,调度的目标则是最大化一个长期效用准则 (该准则是一个吞吐量的函数) 的期望。鉴于计算的复杂度,本文采用了简化版本,这样该算法可以应用于实际系统,而能够这样做的关键是参考文献[10]已经证明该简化并不会明显影响系统的性能。

2 系统模型

本文的应用场景是一个具有 K 个活跃用户和 N 个子载波的系统。本文假设信道在一个数据分组的时间段内是不变的,但是在不同的数据分组之间是按照 Markov 模型进行变化的。其 Markov 模型可以表示为 $h^{t+1}=(1-\alpha)h^t+\alpha w^t$, 其中 w^t 表示单位方差的高斯噪声, α 表示衰退率。本文调度的目的是为了选择传输用户,从 M 个备选调制编码方式 (MCS) (用 $m \in \{1, \dots, M\}$ 作为索引) 中选择相应的 MCS 和为每个子载波分配传输的功率。

本文定义分组错误率为 $\varepsilon = a_m \exp(-b_m p \gamma)^{[10]}$, 其中 p 为传输功率, γ 为子载波增益,同时根据参考文献[12]可知, a_m, b_m 为常数。同时本文还定义了一个指示变量 $I_{n,k,m}^t$, 当 $I_{n,k,m}^t=1$ 时表示用户 k 将在子载波 n 上以 MCS m 的方式进行数据传输; 如果 $I_{n,k,m}^t=0$ 则相反。本文假设在任意一个时刻任何子载波只能分配给一个用户, 因此需要满足约束 $\sum_{k,m} I_{n,k,m}^t \leq 1$ 。同时,根据实际系统的要求,本文还考虑了基站总发射功率的约束 $\sum_{k,m} I_{n,k,m}^t p_{n,k,m}^t \leq P_{\text{out}}$, 其中 $p_{n,k,m}^t$ 表示在时刻 t 分配给组合 (n, k, m) 的功率。

本文的调度目标是最大化长期系统吞吐量的期望,该准则可以通过 $g_{n,k,m}^t = I_{n,k,m}^t (1 - \varepsilon_{n,k,m}^t) r_m^{[10]}$ 计算得到, 其中 $\varepsilon_{n,k,m}^t$ 表示时刻 t 组合 (n, k, m) 的分组错误率, r_m 表示 MCS m 对应的传输码率。为了将该准则转化成其他准则 (如公平性、QoS 等), 本文将引入一个效用函数 $U(\cdot)$ 。 $U(\cdot)$ 具有二阶可导、非递减、有界和凹的性质, 因此可以设计不同的效用函数来满足不同的需求。例如,为了最大化系统容量,可以简



地选择 $U(g)=g$ 。为了得到更好的公平性,可以选择 $U(g)=\omega_k g$,其中 $\{\omega_k\}$ 是独立的用户系数。因此,本文的准则可以支持不同的系统模型。

在本文中,假设每个调度的用户在每个时刻都会反馈 ACK/NAK 给基站,用 $f_{n,k}^t \in \{1,0,\varphi\}$ 表示,其中 1 表示 ACK, 0 表示 NAK, φ 表示在时刻 t 子载波 n 没有分配给用户 k 。同时,所有的用户都会周期地反馈 SNR 给基站,用 $\gamma_{n,k}^t \in \{(0,\infty), \varphi\}$ 表示,其中数字表示用户 k 在子载波 n 上的量化 SNR, φ 表示没有 SNR 的反馈。

3 最优的调度和资源分配

该最优化问题可以建模成一个 POMDP^[13]问题。稍后本文将提出一个在有限时间域 $t \in \{1,2,\dots,T\}$ 上的算法来解决该问题。为了描述该最优化问题,需要一些额外的定义。

$I^t \in \{1,0\}^{NM}$: 表示在时刻 t 调度变量 $I_{n,k,m}^t$ 的集合。

$P^t \in \{0,\infty\}^{NM}$: 表示在时刻 t 功率分配 $P_{n,k,m}^t$ 的集合。

$F^t \in \{1,0,\varphi\}^{NK}$: 表示在时刻 t ACK/NAK 反馈 $\{f_{n,k}^t\}$ 的集合。

$\gamma^t \in \{(0,\infty), \varphi\}^{NK}$: 表示在时刻 t 周期性反馈 SNR $\{\gamma_{n,k}^t\}$ 的集合。

在时刻 t 调度时,本文可以得到如式(1)所示的信息:

$$\begin{aligned} I_{-\infty}^{t-d} &\triangleq \{I_{-\infty}^{\infty}, \dots, I_{-\infty}^{t-d}\}, I^t \in \{1,0\}^{NM} \\ P_{-\infty}^{t-d} &\triangleq \{P_{-\infty}^{\infty}, \dots, P_{-\infty}^{t-d}\}, P^t \in \{0,\infty\}^{NM} \\ F_{-\infty}^{t-d} &\triangleq \{F_{-\infty}^{\infty}, \dots, F_{-\infty}^{t-d}\}, F^t \in \{1,0,\varphi\}^{NK} \\ \gamma_{-\infty}^{t-d} &\triangleq \{\gamma_{-\infty}^{\infty}, \dots, \gamma_{-\infty}^{t-d}\}, \gamma^t \in \{(0,\infty), \varphi\}^{NK} \end{aligned} \quad (1)$$

利用这些信息,本文可以通过求解如下问题得到最优的调度:

$$\begin{aligned} \arg \max_{(I^{t,opt}, P^{t,opt}) \in \chi} E \{ \sum_{n,k,m} I_{n,k,m}^t U_{n,k,m}(g_{n,k,m}^t) + \\ \sum_{\tau=t+1}^T I_{n,k,m}^{\tau,opt} U_{n,k,m}(g_{n,k,m}^{\tau}) | F_{-\infty}^{t-d}, I_{-\infty}^{t-d}, P_{-\infty}^{t-d}, \gamma_{-\infty}^{t-d} \} \\ \text{s.t.} \sum_{k,m} I_{n,k,m}^t P_{n,k,m}^t \leq P_{\text{cont}} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $g_{n,k,m}^t = I_{n,k,m}^t (1 - \varepsilon_{n,k,m}^t) r_m$, $\chi = \{(I, P)\}$ 。

原如式(2)所示的问题(2)的求解是极其复杂的。参考文献[10]将原问题(2)简化成如式(3)所示的问题(3),同时证明这种简化不会明显影响系统的性能。

$$\begin{aligned} \arg \max_{(I^{t,opt}, P^{t,opt}) \in \chi} E \{ \sum_{n,k,m} I_{n,k,m}^t U_{n,k,m}(g_{n,k,m}^t) | F_{-\infty}^{t-d}, I_{-\infty}^{t-d}, P_{-\infty}^{t-d}, \gamma_{-\infty}^{t-d} \} \\ \text{s.t.} \sum_{k,m} I_{n,k,m}^t P_{n,k,m}^t \leq P_{\text{cont}} \end{aligned} \quad (3)$$

参考文献 [10] 提出了两种算法:Brute-Force 和 PG。

Brute-Force 算法通过假设 $I=I$ 将问题(3)转化成一个码率自适应的问题,而码率自适应的问题已经在参考文献[14]中得到了很好的解决。但是 Brute-Force 算法的复杂度是相当高的,其复杂度随着 N 的指数上升。PG 算法首先 $I_{n,k,m}^t \in \{0,1\}$ 将松弛为 $I_{n,k,m}^t \in [0,1]$,然后利用拉格朗日方法进行求解。

但是上述算法有两个重大缺陷。首先,该算法在开始阶段都需要大量的数据分组跟踪信道的变化,所以上述算法不适合那些只有间歇数据的用户。其次,随着活跃用户数量的增加,在调度时刻 t ,只有一部分用户得到调度。那么,未得到调度的用户将不能返回 ACK/NAK 信息。在这段时间内,基站无法继续跟踪这些未调度用户的信道变化,由此导致多用户增益明显下降。为了克服这些问题,本文提出了一种新的信道跟踪方法。

假设信道是按照一阶 Markov 模型进行变化的,本文为了解决该最优调度问题,利用了一种迭代的方式求解 p.d.f. $p(\gamma_{n,k}^t | F_{-\infty}^{t-d}, \gamma_{-\infty}^{t-d})$ 。用户 k 在时刻 t 的信道可以写成离散信道冲击响应的形式: $h_k^t = [h_{1,k}^t, \dots, h_{L,k}^t]^T \in C^L$ 。因此,其频域形式可以写成 $H_k^t = F H_k^t$,其中表示 N-DFT 矩阵的前 L 行。如果加性高斯白噪声的方差为单位方差,那么用户 k 的第 n 个子载波的增益可以写成 $\gamma_{n,k}^t = |H_{n,k}^t|^2$ 。由于实际系统中存在反馈时延,本文的反馈时延设为 d 。当用户反馈 SNR 给基站的时候,算法可以根据 SNR 估计信道在时刻 t 的增益,同时利用反馈回来的 SNR 和 ACK/NAK 更新信道的后验分布。如果没有 SNR 反馈,算法只能依靠 ACK/NAK 反馈估计信道增益和更新信道的后验分布。所以,分布可以由式(4)给出:

$$p(\gamma_{n,k}^t | F_{-\infty}^{t-d}, \gamma_{-\infty}^{t-d}) = \begin{cases} \int p(\gamma_{n,k}^t | h_k^t) p(h_k^t | F_{-\infty}^{t-d}), \gamma_{n,k}^t = \varphi \\ p(\gamma_{n,k}^t | \gamma_{-\infty}^{t-d}), \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中 $p(\gamma_{n,k}^t | h_k^t) = \delta(\gamma_{n,k}^t - |e_n^T G h_k^t|^2)$,是单位矩阵的第 n 行。

利用 Markov 性质和贝叶斯理论^[10]:

$$p(h_k^t | F_{-\infty}^{t-d}) = \int p(h_k^t | h_k^{t-d}) p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d}) \quad (5)$$

$$p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d}) \propto p(f_k^{t-d} | h_k^{t-d}, I_k^{t-d}, P_k^{t-d}) p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d-1}) \quad (6)$$

再次利用 Markov 性质:

$$p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d-1}) = \int_{h_k^{t-d-1}} p(h_k^{t-d} | h_k^{t-d-1}) p(h_k^{t-d-1} | F_{-\infty}^{t-d-1}) \quad (7)$$

由于 ACK/NAK 反馈在子载波之间是相互独立的, 因此:

$$p(f_k^{t-d} | h_k^{t-d}, I_k^{t-d}, P_k^{t-d}) = \prod_{n=1}^N p(f_{n,k}^{t-d} | h_k^{t-d}, I_k^{t-d}, P_k^{t-d}) \quad (8)$$

根据 f 的不同情况, 式(8)可以展开, 计算出如下结果:

$$p(f_{n,k}^{t-d} | h_k^{t-d}, I_k^{t-d}, P_k^{t-d}) = \begin{cases} \sum_m I_{n,k,m}' a_m e^{-b_m P_{n,k,m}' \gamma_{n,k}^{t-d}}, & f = 0 \\ \sum_m I_{n,k,m}' (1 - a_m e^{-b_m P_{n,k,m}' \gamma_{n,k}^{t-d}}), & f = 1 \\ 1 - \sum_m I_{n,k,m}', & f = \varphi \end{cases} \quad (9)$$

如果 ACK/NAK 总是可以得到的, 那么本文可以根据式(6)~式(9)迭代的计算后验分布, 但如果 $f=\varphi$, 那么基站将无法从 MAC 层得到任何有用的信息, 此时本文将利用 PHY 层的 SNR 反馈更新后验分布。假设系统采用非理想的信道估计和 MMSE 信道预测, 那么根据参考文献[12]可以得到如下计算式:

$$p(\gamma_{n,k}' | \gamma_{-\infty}^{t-d}) = \frac{1}{\rho_{m,k}} \exp\left(-\frac{\gamma_{n,k}' + \gamma_{n,k}^{t-d}}{\rho_{m,k}}\right) I_o\left(\frac{2}{\rho_{m,k}} \sqrt{\gamma_{n,k}' \gamma_{n,k}^{t-d}}\right) \quad (10)$$

其中, $\rho_{m,k}$ 表示预测误差和噪声误差的比例, I_o 表示 0 阶的第一类修正贝塞尔函数。

当非调度用户缺乏 ACK/NAK 反馈的情况下, 基站估计得到的后验分布将与真实分布相差甚远。所以系统无法从大量增加的非调度用户中得到任何多用户增益。因此本文利用 SNR 反馈更新后验分布。本文将式(5)中的 $p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d})$ 替换为 $p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d} \gamma_{-\infty}^{t-d})$, 由此得到式(11):

$$p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d}) \cong p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d} \gamma_{-\infty}^{t-d}) = p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d}) p(h_k^{t-d} | \gamma_{-\infty}^{t-d}) \quad (11)$$

但是, SNR 反馈仅仅包含信道的幅度信息。因此, 本文将利用幅度部分的后验分布 $p(\|h_k^{t-d}\|_2^2 | \gamma_{-\infty}^{t-d})$ 取代真实的后验分布 $p(h_k^{t-d} | \gamma_{-\infty}^{t-d})$ 。式(11)可以改写成为:

$$p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d} \gamma_{-\infty}^{t-d}) = p(\|h_k^{t-d}\|_2^2 | \gamma_{-\infty}^{t-d}) p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d}) \quad (12)$$

在计算过程中, 本文利用粒子滤波^[5]的方式(其粒子滤波的长度为 S)计算很复杂的积分过程, 如式(4)、式(5), 这样算法便可以应用于实际系统。假设调度的起始时刻是

t_0 。为了加快收敛的速率, 每一个用户在时刻 t_0 都会反馈他们的 SNR。

当用户很少的时候, 算法仅依靠 ACK/NAK 就可以很好地跟踪信道的变化。在这种情况下, 本文不需要额外的 SNR 反馈。但是, 当用户数量很大时, 本文需要周期性的 SNR 反馈提升多用户增益。为此本文设置了一个阈值 N 。基于上述的讨论, 本文提出了两种算法。

对于算法 1 其具体步骤如下所示。

算法 1: CLFS(cross-layer feedback scheduling, 跨层反馈调度)算法

初始化:

$$p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d}) \text{ for } t \in \{t_0 - d, \dots, t_0 - 1\}$$

While 1:

If $t < t_0 + d$

每个用户反馈 SNR γ_k^{t-d} 给基站

Else

得到新的观测 γ_k^{t-d} 和 f_k^{t-d}

End If

用式(7)计算 $p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d-1})$

用式(8)和式(9)计算 $p(f_k^{t-d} | h_k^{t-d}, I_k^{t-d}, P_k^{t-d})$

If $\gamma_{n,k}' = \varphi$

用式(6)计算 $p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d})$

Else

用式(6)和式(11)计算 $p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d} \gamma_{-\infty}^{t-d})$

End If

用式(5)计算 $p(h_k' | F_{-\infty}^{t-d})$

For $n \in [1 \dots N]$

用式(4)计算 $p(\gamma_{n,k}' | F_{-\infty}^{t-d} \gamma_{-\infty}^{t-d})$

计算 $E\{\gamma_{n,k}' | F_{-\infty}^{t-d} \gamma_{-\infty}^{t-d}\}$

End For

利用参考文献[10]提出的 PG 算法进行调度

End While

对于算法 2, 其具体实施步骤如下所示。

算法 2: ACLFS(adaptive cross-layer feedback scheduling, 自适应跨层调度)算法

初始化:

$$p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d}) \text{ for } t \in \{t_0 - d, \dots, t_0 - 1\}$$

While 1

If $t < t_0 + d$



每个用户反馈 SNR γ_k^{t-d} 给基站

Else

If $K > N$

得到新的观测 γ_k^{t-d} 和 f_k^{t-d}

Else

得到新的观测 f_k^{t-d} 和 $\gamma_{n,k}^{t-d} = \varphi$

End If

End If

利用式(7)计算 $p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d-1})$

利用式(8)和(9)计算 $p(f_k^{t-d} | h_k^{t-d}, I_k^{t-d}, P_k^{t-d})$

If $\gamma_{n,k}^t = \varphi$

利用式(6)计算 $p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d})$

Else:

利用式(6)和式(11)计算 $p(h_k^{t-d} | F_{-\infty}^{t-d}, \gamma_{-\infty}^{t-d})$

End If

利用式(5)计算 $p(h_k^t | F_{-\infty}^{t-d})$

For $n \in [1 \cdots N]$

利用式(4)计算 $p(\gamma_{n,k}^t | F_{-\infty}^{t-d}, \gamma_{-\infty}^{t-d})$

计算 $E\{\gamma_{n,k}^t | F_{-\infty}^{t-d}, \gamma_{-\infty}^{t-d}\}$

End For

利用参考文献[10]提出的 PG 算法进行调度

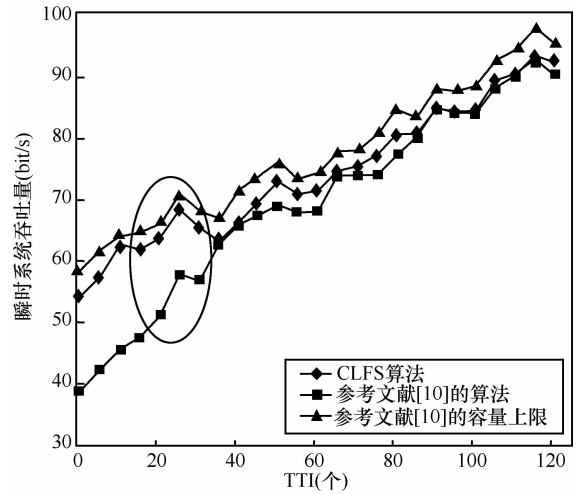


图1 瞬时系统吞吐量与 TTI 的关系
($L=7, N=30, K=5, S=30, SNR=10$ dB)

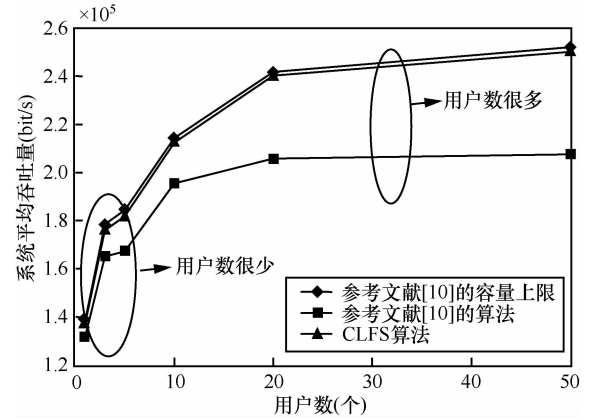


图2 活跃用户数量与系统平均吞吐量的关系
($L=7, N=30, K=5, S=30, SNR=10$ dB)

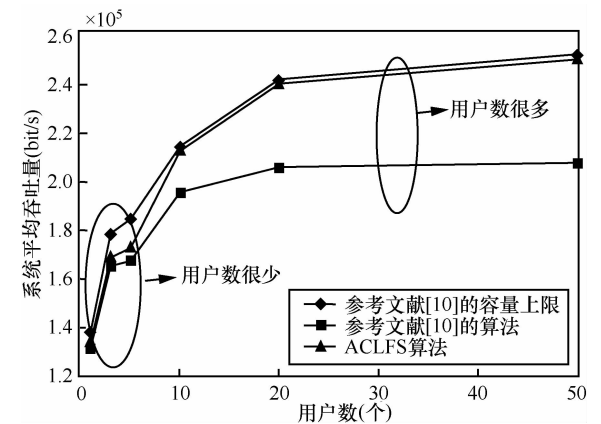


图3 自适应调度算法的性能

图3显示了本文提出的自适应调度算法的性能。当活跃用户很少时,自适应的算法仅仅依赖于ACK/NAK反馈信息,其调度的性能依然很优越。当用户数增加时,算法自动切换到跨层联合调度的范畴,这样就保证了多用户增益

4 仿真结果

本文的仿真场景为一个单小区模型,其中包含一个基站, K 个活跃用户和 $N=30$ 的子载波。其他参数为衰退率 $\alpha=0.001$,冲击响应长度 $L=7$ 。下面将本文提出的算法与参考文献[10]中的算法进行对比。

从图1可以看出,对比算法需要大量的数据分组训练信道的变化,对于那些具有少量间歇数据业务的用户来讲,显然该算法是不能容忍的。本文提出的算法可以很好地解决该问题。通过用户在调度的起始时刻反馈信噪比给基站,本文的调度算法在初始化阶段就可以很好地跟踪信道变化,因此本文的算法是很成功的。

图2显示了活跃用户数量与系统平均吞吐量的关系。随着活跃用户数量 K 的增加,所有的算法都能够提升系统吞吐量。但是当用户数量达到一定数量时,容量出现瓶颈,且与理论容量上界有很大的差距。但本文提出的算法却可以非常完美地工作。因此与系统容量的提升相比,增加少量反馈的开销是值得的。

和系统容量。因此,自适应算法可以更加充分地利用 ACK/NAK 反馈信息和信噪比信息。

5 结束语

利用跨层信息减小反馈开销是值得研究的课题。因此本文将 ACK/NAK 信息和信噪比信息都认为是信道状态的一种指示。基于该跨层观测,本文提出了一种新的信道状态的近似策略。通过仿真证明该策略是十分有效的。本文通过利用 ACK/NAK 信息拉长了 SNR 反馈的周期,从而在保证系统性能的前提下,大大降低了系统的反馈开销。同时,本文通过采用粒子滤波和简化 POMDP 模型使得本文的算法可以应用于实际的系统中。

本文将该问题建模成一个 POMDP 问题,但是 POMDP 问题的数学复杂度很大程度上依赖于决策空间的维度。对于一个离散的决策空间,在很多情况下,最优策略的选择是一件十分困难的事情。今后笔者将致力于研究如何将原来的模型做有效简化,尤其是如何降低决策空间的维度和修改观测模型。

参考文献

- Viswanath P, Tse D, Laroia R. Opportunistic beamforming using dumb antennas. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, 48(6): 1277~1294
- Jang J, Lee K N. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems. *IEEE J Select Areas In Commun*, 2003,21(2):171~178
- Wang I C, Evans B L. Optimal OFDMA resource allocation with linear complexity to maximize ergodic weighted sum capacity. *Proc IEEE Int Conf Acoustics, Speech and Signal Processing*, Honolulu, Hawaii, Apr 2007
- Seong K, Mohseni M, Cioffi J M. Optimal resource allocation for OFDMA downlink systems. *Proc IEEE Int Symposium Info Theory*, Seattle, Washington, 2006:1394~1398
- Wong C Y, Cheng R S, Letaief K B, *et al.* Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation. *IEEE J Sel Areas Commun*, 1999,17(10): 1747~1758
- Jang J, Lee K B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2003,21(2): 171~178
- Love D J, Heath R W, Lau V K N, *et al.* An overview of limited feedback in wireless communication systems. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2008,26(8):1341~1365
- Bertsekas D P, Gallager R G. *Data Networks*, 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1992
- Wang R, Lau V K N. Robust optimal cross-layer designs for TDD_OFDMA systems with imperfect CSIT and unknown interference state-space approach based on 1-bit ACK/NAK feedback. *IEEE Trans Commun*, 2008, 56(5):754~761
- Aggarwal R, Koksall C E, Schniter P. Joint Scheduling and Resource Allocation in OFDMA Downlink Systems Via ACK/NAK Feedback. *IEEE Trans Signal Processing*, 2012,60(6): 3217~3227
- Ho Z K M, Lau V K N, Cheng R S K. Cross-layer design of FDD-OFDM systems based on ACK/NAK feedbacks. *IEEE Trans Inf Theory*, 2009,55(10):4568~4584
- Wong I C, Evans B L. Optimal resource allocation in the OFDMA downlink with imperfect channel knowledge. *IEEE Trans Commun*, 2009:57(1):232~241
- Monahan G E. A survey of partially observable Markov decision processes: theory, models, and algorithms. *Manag Sci*, 1982, 28(1):1~16
- Aggarwal R, Assaad M, Koksall C E, *et al.* Joint scheduling and resource allocation in the OFDMA downlink: utility maximization under imperfect channel-state information. *IEEE Trans Signal Process*, 2011,59(11):5589~5604
- Arulampalam M S, Maskell S, Gordon N, *et al.* A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking. *IEEE Trans Signal Processing*, 2002,50(2):174~188

[作者简介]



尹逊宫,男,复旦大学硕士研究生,主要研究方向为 LTE 架构下的 MAC 资源调度算法研究。



冯辉,男,复旦大学讲师,主要研究方向为分布式信号处理理论及应用。



杨涛,男,复旦大学副教授,主要研究方向为宽带无线通信理论及信号处理。

胡波,男,复旦大学教授、博士生导师,主要研究方向为数字信号处理、数字通信和系统设计。

(收稿日期:2012-12-20)